1990—2021年内蒙古遥感生态环境质量变化及趋势分析——以呼伦贝尔市陈巴尔虎旗为例

张雨斯[1,2]， 包玉海[1,2]， 贺忠华[3]

（1. 内蒙古师范大学地理科学学院，内蒙古 呼和浩特 010022；2. 内蒙古自治区遥感与地理信息系统重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010022；3. 浙江省气候中心，浙江 杭州 310056）

摘 要：基于长时间序列遥感数据，提取能够反映生态环境质量的4个关键指标，利用主成分分析方法构建了遥感生态指数(Remote Sensing Ecological Index, RSEI)，结合Mann-Kendall趋势显著性检验分析内蒙古呼伦贝尔草原1990—2021年生态环境质量变化情况及变化趋势。结果表明：(1) RSEI能够全面反应内蒙古草原生态环境质量。30 a间草原生态环境质量以改善为主，整体呈现每年0.0037的上升趋势（$P<0.01$），线性回归R^2达0.39。通过M-K趋势显著性检验，RSEI在2012—2021年间呈现显著上升趋势，遥感生态环境质量得到明显改善。(2) 总体而言，研究区内RSEI的植被绿度对第一主成分的贡献最大，因此二者结果存在较高相似度；但生态环境质量的构成包括绿度、干度、湿度和热度等多要素，单一绿度难以完全表征区域生态质量情况。(3) RSEI呈现出由西向东逐渐变好的空间分布状况。研究区西部牧业草原地区生态质量状况差于东部森林、农耕地区，RSEI空间呈现趋势与植被覆盖度相同。本研究丰富了内蒙古草原生态环境质量评估方法，可为内蒙古草甸草原的生态保护、生态修复、开发利用和持续发展提供重要参考。

关键词：呼伦贝尔草原；陈巴尔虎旗；遥感生态指数；Landsat；时空分析

生态环境质量状况与人类生活息息相关，协调草原生态健康与生态环境保护间的关系，是推动我国草原可持续发展的核心问题之一。正确认识和评价草地生态环境质量对提高草地资源利用效率和生态环境保护具有重要的现实意义[1]。

呼伦贝尔草原地处蒙古高原东部草原腹地，拥有纯天然草甸草原。作为我国典型的气候变化敏感区，呼伦贝尔草原的生态环境质量近几十年来一直受到气候变化和人类活动的影响[2]。研究表明，近30 a来，呼伦贝尔市陈巴尔虎旗的平均气温呈明显上升趋势，而降水量呈明显下降趋势，导致呼伦贝尔草原自然灾害频发，给草原地区经济与社会可持续发展带来了巨大威胁[3]。由于内蒙古草原生态环境的时空变化对内蒙古草原未来资源保护、开发和利用具有重要影响，因此有必要结合遥感时空数据对草原生态进行更加精确的研究，探求草原生态的变化趋势和特征，为进一步改进和强化内蒙古草原的资源保护和合理开发利用提供科学依据与数据支撑。

遥感生态指数（Remote Sensing Ecological Index, RSEI）是综合评价生态环境质量的有效方法，是专门为利用遥感技术评价生态状况而开发的一种综合评价指标[4]。RSEI是多因子变化综合分析，较单因子分析而言，多因子综合分析更加全面和准确。而且，RSEI可以将反映生态问题的绿度指标（NDVI）、湿度指标（Wet）、干度指标（NDBSI）和热度指标（LST）通过主成分分析方法进行耦合，形成一个可以量化的生态环境质量指数。近些年，RSEI分析主要侧重于长时间序列如20~30 a间生态环境质量状况，空间上集中于如矿区、城市、流域、村落、海岸线等[5-12]。如排日海·合力力等[6]以新疆乌鲁木齐市为研究区，利用RSEI对当地生态环境进行了评

收稿日期：2022-05-28； **修订日期：**2022-11-24
基金项目：国家自然科学基金（21K20200001）；浙江省自然科学基金（LQ21d050001）
作者简介：张雨斯（1994-），女，在读博士研究生，主要从事叶绿素荧光遥感研究. E-mail: zhangyusi@mails.imnu.edu.cn
通讯作者：包玉海. E-mail: baoyuhai@imnu.edu.cn

价；高鹏文等[7]为了了解哈密市生态环境变化，对干旱区城镇哈密市伊州区的生态质量进行遥感动态监测，研究结果表明生态环境质量总体向好；张亚球等[8]使用RSEI对区县级生态环境进行评价研究。

GEE利用Google的海量计算能力可以解决各种具有重大影响的社会问题[13-14]。Gorelick等[13]在研究中将GEE数据、系统架构、数据分布模式、效率性能、应用与未来挑战都进行了详细介绍。Lu等[14]基于GEE平台和中分辨率成像光谱仪(Moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS)数据，利用RSEI分析了北京近20 a来生态环境质量的时空变化，研究表明，2001—2020年北京生态环境质量有所改善。因此，考虑到目前内蒙古草原生态环境研究的方法和手段还相对较少，对其生态系统和环境质量变化的研究还缺少完善的体系，本文利用与生态环境质量有关的气候条件、大气环境、植被状况等遥感数据，选用与生态环境质量直接相关的4个指标（绿、湿、干、热），结合GEE平台构建内蒙古草原生态环境时空变化综合指数，重点对内蒙古牧业草原放牧+农田耕作的草原生态环境变化情况进行系统探究，对内蒙古草原生态文明建设具有重要意义。

1　数据与方法

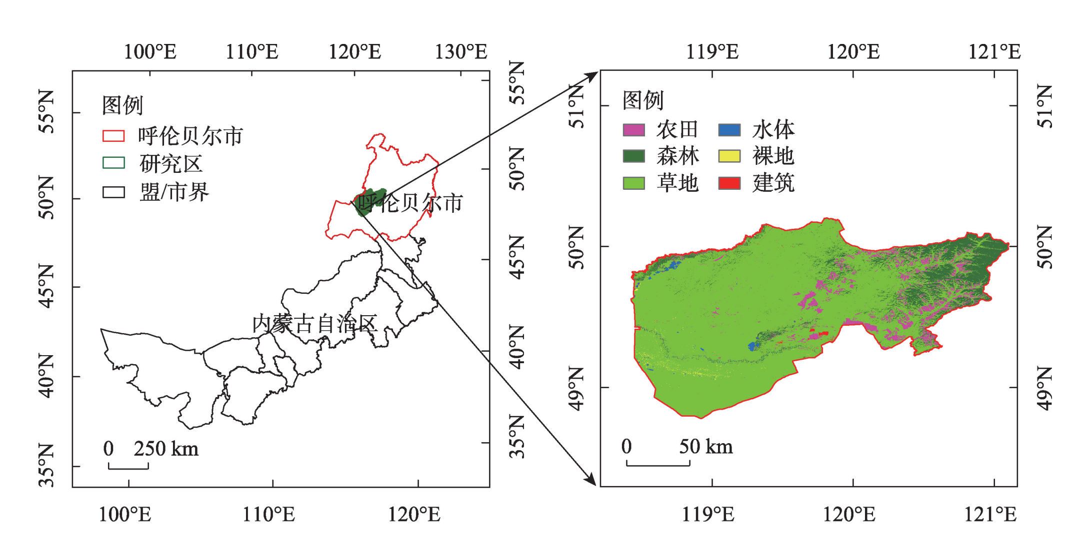
1.1　研究区概况

研究区位于内蒙古自治区呼伦贝尔市陈巴尔虎旗，属于呼伦贝尔草原核心区域[15]，如图1所示。地处48°48′~50°12′N，118°22′~121°02′E。研究区总面积约1.86×10⁴ km²，平均气温在0 ℃左右，属于典型的中温带大陆性草原气候，四季气候特点明显[16]。由东北向西南地势逐渐降低，研究区内植被类型主要为森林和草甸草原两类[17]。

1.2　数据来源与方法

1.2.1　遥感数据来源　使用的卫星遥感资料由美国地质调查局（United States Geological Survey, USGS）(https://earthexplorer.usgs.gov/) 提供，数据源为1990—2021年陆地卫星Landsat 5、Landsat 7和Landsat 8影像，空间分辨率均为30 m，通过GEE平台进行数据处理。

鉴于3个传感器波谱差异，考虑到数据稳定性与可对比性，其中Landsat 5选用1990—2011年7—9月的反射率，如1990年选用7月7日、7月23日、8月17日、8月24日、8月26日和9月2日六期影像；Landsat 7选用2012年7—9月的反射率；Landsat 8选用2013—2021年7—9月的反射率。分别计算每副影像的NDVI、WET、NDBSI和LST 4个指标（绿、湿、干、热），其中LST利用最大值合成，其余3种指标为中值合成。Landsat数据包括主题成像仪TM、卫星传感器ETM+和OLI 3种数据，为尽量消除卫星影像获取时间差异带来的结果的不确定性，充分体现研究区植被信息，遥感影像成像时间选定为7—9月草原生长最旺盛阶段[16]。数据异常年份采用前后2 a数据平均值替代，对所有数据均进行了数据中值平滑处理。



注：底图采用自然资源部标准地图制作，审图号为GS(2016)2556号，对底图边界无修改。下同。

图1　研究区概况

Fig. 1　Study area

1.2.2 遥感生态指数计算

(1) 绿度指标

绿度指标用归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)来代表,计算公式为:

$$NDVI=(\rho_{NIR}-\rho_{Red})/(\rho_{NIR}+\rho_{Red}) \quad (1)$$

式中:ρ_{NIR}、ρ_{Red}分别代表遥感影像近红外波段(Landsat 5遥感数据中第4、3波段)和红波段(Landsat 8中第5、4波段)的反射率。

(2) 湿度指标

缨帽变换得到3个湿度分量(Wet),即亮度、绿度和湿度。其中湿度分量反映植被、土壤、水体中湿度值,是生境变化在生态研究中重要指示指标。不同卫星传感器的表达式不同:

$$Wet_{TM}=0.0315\rho_1+0.2021\rho_2+0.3102\rho_3+0.1594\rho_4-0.6806\rho_5-0.6109\rho_7 \quad (2)$$

$$Wet_{OLI}=0.1511\rho_2+0.1972\rho_3+0.3283\rho_4+0.3407\rho_5-0.7117\rho_6-0.4559\rho_7 \quad (3)$$

式中:Wet表示卫星监测湿度指标,由蓝、绿、红、近红外和短波红外的地表反射率计算得到;ρ_1~ρ_5和ρ_7分别对应Landsat 5的第1~5、7波段和Landsat 8中第2~7波段。

(3) 干度指标

土壤指数(SI)和建筑指数(IBI) 2个指数合成代表干度指标,表达式为:

$$NDBSI=(SI+IBI)/2 \quad (4)$$

$$SI=(\rho_{SWIR1}+\rho_{Red})-(\rho_{Bule}+\rho_{NIR})/(\rho_{SWIR1}+\rho_{Red})+(\rho_{Bule}+\rho_{NIR}) \quad (5)$$

$$IBI=\left.\left\{\frac{2\rho_{SWIR1}}{(\rho_{SWIR1}+\rho_{NIR})}-\left[\frac{\rho_{NIR}}{(\rho_{NIR}+\rho_{Red})}+\frac{\rho_{Greed}}{(\rho_{Greed}+\rho_{SWIR1})}\right]\right\}\middle/\left\{\frac{2\rho_{SWIR1}}{(\rho_{SWIR1}+\rho_{NIR})}+\left[\frac{\rho_{NIR}}{(\rho_{NIR}+\rho_{Red})}+\frac{\rho_{Greed}}{(\rho_{Greed}+\rho_{SWIR1})}\right]\right\}\right. \quad (6)$$

式中:NDBSI为干度指标;IBI为建筑指数;SI为土壤指数;ρ_{Red}、ρ_{Greed}、ρ_{Blue}、ρ_{NIR}、ρ_{SWIR1}分别为Landsat 5中第1、2、3、4、5波段反射率和Landsat 8中第2、3、4、5、6波段反射率(分别为红波段、绿波段、蓝波段、近红外波段和短波红外1波段)。

(4) 热度指标

选用地表温度,利用卫星监测遥感数据热红外波段辐射值加最新修订定标参数来代表,表达式为:

$$LST=T/[1+(\lambda T/\rho)\ln\varepsilon] \quad (7)$$

其中:

$$T=K_2/\ln(K_1/L_6+1) \quad (8)$$

$$L_6=L_g\times L_{DN}+L_b \quad (9)$$

式中:LST为热度指标;T为传感器温度值;λ为Landsat 5数据的波段6,中心波长为11.5 μm,或Landsat 8数据的波段10,中心波长10.9 μm;ρ为1.438×10^{-2} mK;ε为地表比辐射率,根据Sobrino提出的NDVI阈值处理获得;K_1、K_2为最新修订定标参数;L_6为辐射值;L_g为热红外波段的增益值;L_{DN}为像元灰度值;L_b为偏置值,可从遥感影像头文件中获取。

1.2.3 技术路线 本研究的具体工作流程如图2所示。首先,基于GEE云平台上存储的Landsat影像数据,计算NDVI、WET、NDBSI和LST 4个遥感指标,并利用主成分分析(PCA)生成了1990—2021年陈巴尔虎旗RSEI的时空分布图。在此基础上,运用M-K趋势分析方法对陈巴尔虎旗生态质量变化趋势进行分析和检验。

1.3 RSEI遥感生态指数模型构建

采用PCA构建RSEI,对每个主成分的贡献度主动确定,将NDVI、WET、NDBSI和LST 4个指标信息集中于第一到第二个主成分中,得到第一主成分特征向量PC1[4]。然而,由于遥感数据提取的4个指标量纲不同,每个指标都需要归一化处理。同时,为了避免大量水域面积影响主成分分析载荷分布,采用水体指数(NDWI)将各指标中水体掩膜处理后,进行指标归一化和主成分分析。指标归一化方法如下:

$$NI_i=(I-I_{min})/(I_{max}-I_{min}) \quad (10)$$

式中:NI_i为第i种指标归一化后的值,取值范围为[0,1];I为各个指标在像元i的值;I_{min}为该指标的最小值;I_{max}为该指标的最大值。

$$RSEI_0=1-PC1(NDVI,WET,LST,NDBSI) \quad (11)$$

$$RSEI=RSEI_0-RSEI_{min}/RSEI_{max}-RSEI_{min} \quad (12)$$

对归一化后的4个指标进行主成分分析,不同年份分别进行PCA分析后,每年数据提取PC1,并通过1减去PC1获得每年初始的$RSEI_0$,以保证数值越大其生态质量越好;对$RSEI_0$进行归一化处理,方便生态环境质量比较。最后,运用等间距分级方法,对RSEI每0.2划分一个等级,共5个等级,分别代表生态质量差、较差、一般、良好和优。

1.4 M-K趋势显著性检验

M-K趋势显著性检验是一种非参数检验,用于分析和测量非线性系统的非周期性周期长度。不需

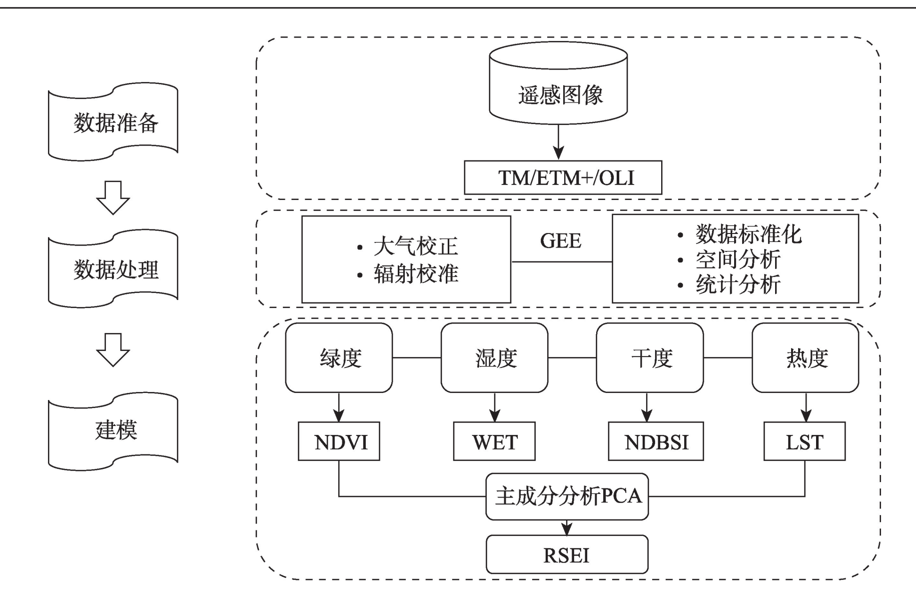


图2　技术路线

Fig. 2　Technology roadmap

要数据呈正态分布，对时间序列中的异常值敏感性较低，可从某个方面揭示时间序列的演化规律[18]。鉴于M-K趋势显著性检验方法可以确切的得到突变点，因此本文使用M-K法进行生态环境质量突变检测。

对于n个样本的时间序列x，构建一个序列：

$$S_k=\sum_{i=1}^{k} r_i, r_i=\begin{cases}1, x_i>x_j \\ 0, x_i\leqslant x_j\end{cases}(j=1,2,\cdots,i;\ k=1,2,\cdots,n) \quad (13)$$

式中：秩序列S_k是第i时刻数值大于j时刻数值个数的累计数。

定义统计变量：

$$UF_k=\frac{\left(S_k-E\left[S_k\right]\right)}{\sqrt{\operatorname{var}\left[S_k\right]}} \quad (14)$$

其中：

$$E\left[S_k\right]=\frac{k(k-1)}{4}, \operatorname{var}\left[S_k\right]=\frac{k(k-1)(2k+5)}{72}, 1\leqslant k\leqslant n \quad (15)$$

$E\left[S_k\right]$为S_k的均值，$\operatorname{var}\left[S_k\right]$为$S_k$的方差。

给定显著性水平α，如果$|UF_k|>U_\alpha$，表示该序列有明显的趋势。参考这个方法逆序，可以存在UB_k：

$$UB_k=-UF_k,\quad (k=n,n-1,\cdots 1) \quad (16)$$

式中：UF为一条变化曲线；UB表征正确的逆序序列的发展趋势。如果UF和UB曲线的交点在显著水平α之内，则交点的具体年份确定，说明该年份的参数呈现突增状态。基于Python实现了自动制图，直观展现UF和UB曲线的交汇点，用于M-K突变检测。

2　结果与分析

2.1　RSEI与各指标统计值分析

通过PCA对研究区进行生态环境质量分析，如表1所示PC1最稳定，特征值贡献率远大于其他3个主成分特征值贡献率。4个年份中PC1的特征值所占比例均在58%以上，说明PCA分析法效果显著，对遥感生态指数计算具有代表性。其他主成分分量值忽大忽小，说明其对生态指标的信息包含不完整。PC1中NDVI和WET为正值，说明NDVI和WET对生态环境起到了正面效应，而LST和NDBSI指数呈负值，说明其对环境产生了负面影响，符合实际生态情况，与前人研究一致[7,9-10]。

由表2可知，1990—2020年期间，研究区内RSEI呈缓慢变好趋势，RSEI均值由0.46上升至0.52，总体上升了约13.13%，30 a间RSEI总体趋势为先下降后上升。WET和NDBSI均值基本保持不变，但2020年WET均值低至0.283。LST均值基本呈现逐渐增大趋势。NDVI均值由1990年逐渐下降，至2020年出现最大值0.705。总体说明虽然内蒙古呼伦贝尔草原农牧结合发展进程快速，但呼伦贝尔草原坚持生态优先、绿色发展理念[19]，人们环境保护意识的不断提升，草原植被长势总体偏好、草原生产能力明显提高[20]，使得草原畜牧业发展并没有对内蒙古呼伦贝尔草原造成巨大伤害[19-21]。

表1 主成分分析结果

Tab. 1 Principal component analysis

参数	1990年				2000年			
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC1	PC2	PC3	PC4
NDVI	0.660	−0.601	−0.437	−0.113	0.64	−0.593	−0.488	0.0204
LST	−0.352	−0.775	0.524	0.0357	−0.611	−0.778	0.142	−0.046
NDBSI	−0.588	−0.135	−0.555	−0.573	−0.432	0.205	−0.827	−0.295
WET	0.308	0.145	0.476	−0.811	0.177	−0.039	0.239	−0.954
特征值	0.0201	0.007	0.0028	0.0008	0.0335	0.0112	0.0036	0.0005
特征值贡献率/%	65.50	22.85	9.12	2.52	68.51	22.99	7.41	1.09
参数	2010年				2020年			
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC1	PC2	PC3	PC4
NDVI	0.764	0.517	0.384	−0.0401	0.549	−0.692	−0.468	0.0231
LST	−0.477	0.855	−0.203	0.00253	−0.331	−0.695	0.639	−0.015
NDBSI	−0.302	−0.0324	0.563	−0.703	−0.732	−0.190	−0.593	−0.277
WET	0.313	0.00985	−0.768	−0.639	0.229	0.0488	0.15	−0.961
特征值	0.0309	0.0197	0.00239	0.000525	0.0331	0.0071	0.0035	0.0004
特征值贡献率/%	57.77	36.78	4.47	0.98	75.05	16.05	7.95	0.95

表2 各年份统计结果

Tab. 2 Statistical results of each year

参数	1990年				2000年			
	最大值	最小值	平均值	标准差	最大值	最小值	平均值	标准差
RSEI	0.992	0.0186	0.463	0.164	0.992	0.0240	0.412	0.132
NDVI	0.957	−0.597	0.610	0.109	0.973	−0.465	0.559	0.136
LST	32.248	3.942	19.578	2.402	46.605	10.466	27.241	4.648
NDBSI	1.600	−3.228	−0.0694	0.0978	0.632	−0.731	0.0414	0.104
WET	0.923	−0.820	0.627	0.056	1.0044	−1.122	0.772	0.0419
参数	2010年				2020年			
	最大值	最小值	平均值	标准差	最大值	最小值	平均值	标准差
RSEI	0.968	0.00632	0.481	0.179	0.994	0.00232	0.523	0.131
NDVI	0.998	−0.696	0.552	0.160	1	−0.498	0.705	0.131
LST	45.501	8.182	29.215	5.20	50.687	−19.225	37.574	6.424
NDBSI	1.788	−11.760	0.0652	0.126	0.291	−0.729	−0.0371	0.132
WET	0.99	−0.894	0.6005	0.0666	0.793	−0.227	0.283	0.0471

2.2 土地利用类型变化

研究区主要土地利用类型为农田、森林、草地、水体等几类[22]，全旗大部分为草地，东北部为森林，农田分布在中部与东部区域。图3中草地占比在81.7%~87.4%左右，森林占比在7.7%~11.3%左右，农田占比在3.8%~5.9%左右，水体占比在0.52%~0.69%左右。1990—2020年土地类型转移中草地是转移比例最高的土地类型，图4中主要列举了1990—2020年间转移最多的3种土地利用类型，草地与农田类型的转换多发生在研究区的东北部区域。从表3中可以看出，1990—2020年间草地覆盖与其他各类土地类型均有转入转出，且规模相对较大，土地利用结构属于不稳定状态。除相同土地类型转移外，其他类型转移中农田-草地面积约177.97 km^2，占农田转出面积的26.89%；草地-农田面积约550.47 km^2，占草地转出面积的3.61%；草地-森林面积约590.34 km^2，占草地转出面积的3.88%。

2.3 RSEI时空序列变化分析

图5为陈巴尔虎旗各年份RSEI统计分析。2006年RSEI平均值最低，为0.33，而2018年RSEI

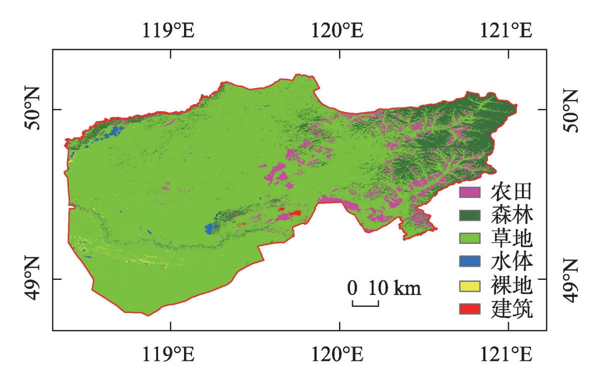


图3　2020年土地利用类型现状

Fig. 3　Land use type of 2020

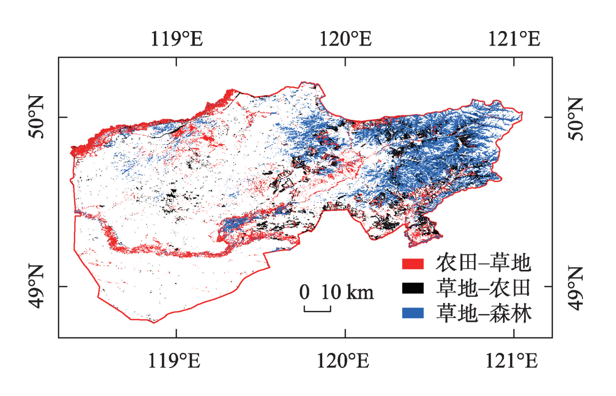


图4　1990—2020年土地利用类型转移

Fig. 4　Land use type transfer from 1990 to 2020

平均值达30 a最大值(0.57),较1990年RSEI平均值(0.46)增长了0.11,涨幅达23.9%。NDVI整体趋势与RSEI走势表现相近,其中,2007年NDVI平均值最小为0.49,最大值出现在2021年为0.76,较1990年NDVI(0.61)增长了24.6%。LST呈现增加-减少-增加的波动变化,波动范围在20~40 ℃之间。因研究区内建筑、裸土分布相对较少,所以NDBSI平均值并不是很高,在0.1左右。总体来看,RSEI均值在1990—2021年整体呈上升趋势,表明30 a干度和热度对生态环境的负效应明显小于绿度和湿度对生态环境的正效应。

由图6可知,空间尺度上,由于研究区土地利用类型不同,研究区西部分布多为草甸草原,生产方式以纯牧业为主;东部多为农田和森林结合地带,生产方式以牧业+耕地为主,植被覆盖度呈现由西向东逐渐递增的趋势[16]。RSEI与植被覆盖度呈现由高向低的转化趋势一致,可以清晰地观察到RSEI空间分布格局呈现为由西向东逐渐变好的态势[17]。时间尺度上,从1990—2021年,草地与森林、农田RSEI值在120°E附近出现明显界限,并随时间增加逐渐东移。

2.4　RSEI等级变化

由图7可知,各年份RSEI面积变化除优等级呈下降趋势外,其他各等级均有不同程度的上升趋势,其中较差等级趋势变化最大,R^2=0.41,其次为一般和优,R^2分别为0.35和0.34。对1990—2021年各生态等级面积进行统计分析,优占比13%~28.8%之间,良好占比25.1%~49.2%之间,一般占比20.3%~36.8%,较差占比1.5%~27.9%,差占比0%~2.3%,因此优、良好和一般的面积占比较大。

由图8可知,陈巴尔虎旗西北方向草原牧业区域1990—2020年间RSEI变化趋势呈现显著变好,其他大部分是略微变好和无变化部分。1990—2000年、2010—2020年间大部分为略微变好,2000—2010年间大部分为无变化与略微变好,1990—2020年绝大部分是略微变好与显著变好,表明陈巴尔虎旗30 a间生态环境质量状况总体呈现变

表3　研究区1990—2020年土地类型转移

Tab. 3　Land use type transfer in the study area from 1990 to 2020　　/km²

		1990年							
		草地	建筑	裸地	农田	森林	湿地	水体	总计
2020年	草地	13993.36	0.057	11.00231	177.971	15.939	24.170	19.0455	14241.55
	建筑	29.073	2.17694	0.213	2.649	0.367	0.254	4.0404	38.774
	裸地	48.155	0.00293	10.215	0.545	0	0.0351	0.902	59.854
	农田	550.467	0	0.0164	440.137	34.674	2.950	2.358	1030.604
	森林	590.342	0.0105	0.0240	36.940	1301.938	6.00475	15.216	1950.475
	湿地	0.114	0	0	0.0998	0.00704	1.188	0.0382	1.446
	水体	17.476	0.109	0.127	3.598	0.0892	1.921	67.497	90.817
	总计	15228.99	2.357	21.598	661.939	1353.014	36.522	109.096	17413.52

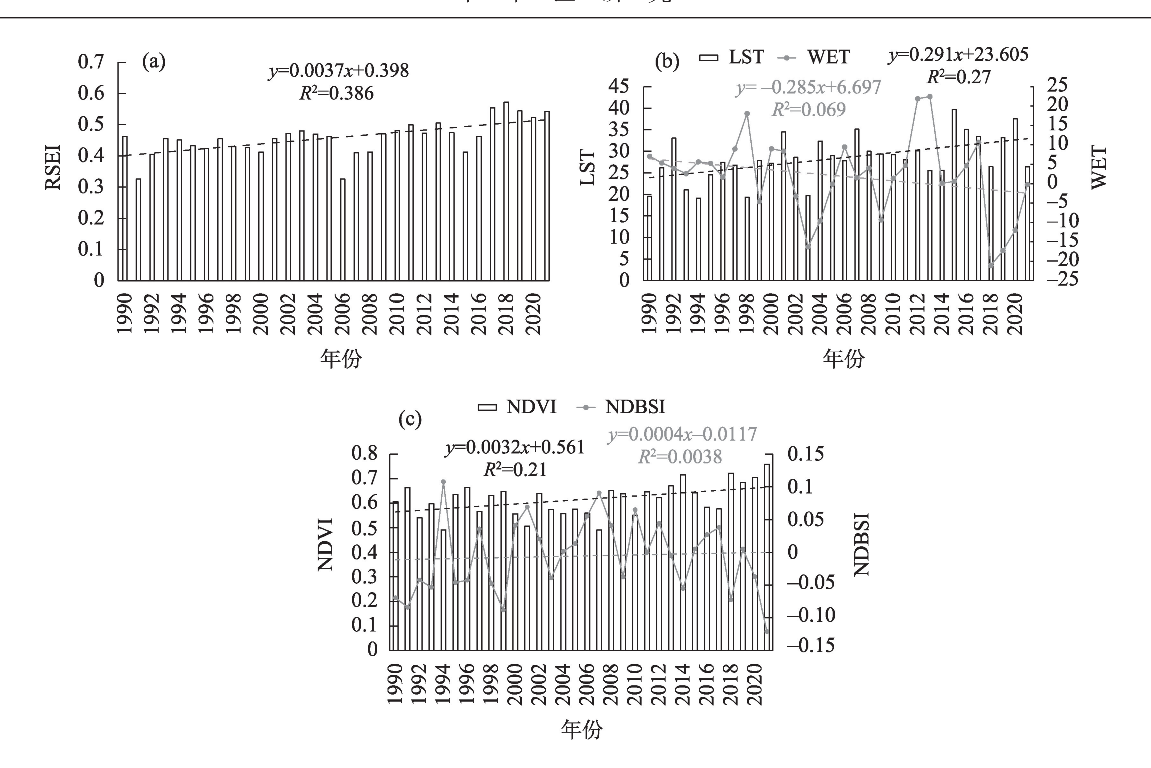


图5 各指标时间序列变化

Fig. 5 Time series changes of each indicator

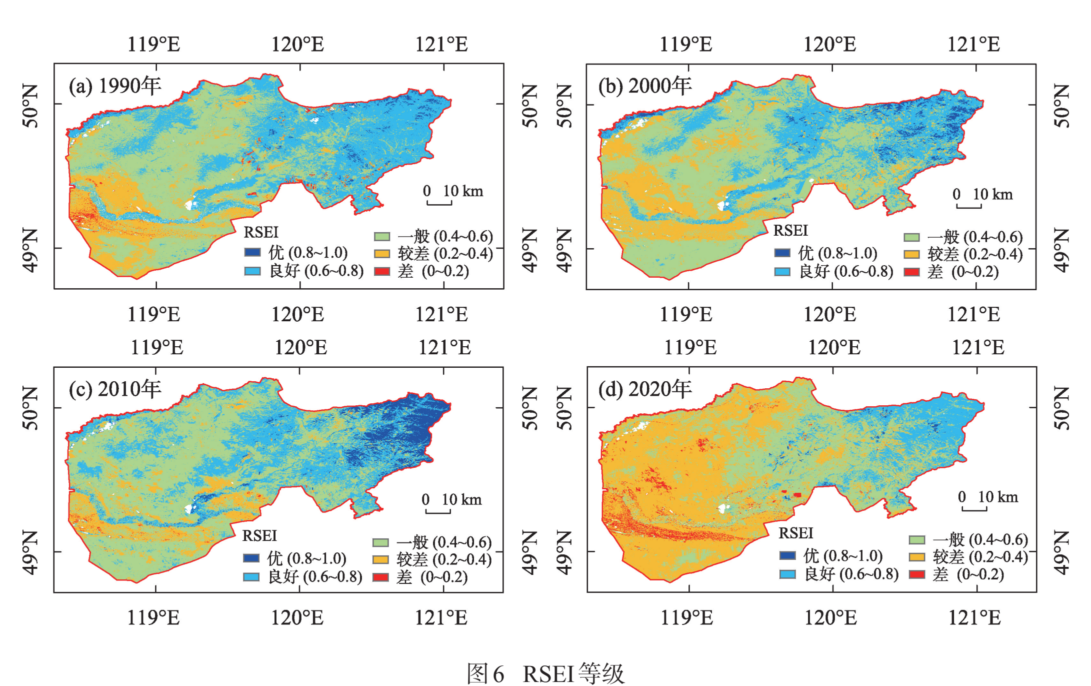


图6 RSEI等级

Fig. 6 Ranking of RSEI

好趋势,其中2010—2020年间变好趋势最高。

2.5 M-K趋势分析

如图9可知,从1990—2001年间RSEI呈现下降趋势;自2001年以来,平均RSEI呈现出较明显上升趋势。*UF*曲线在2012—2021年间远远超过置信水平,在此期间RSEI急剧上升。

30 a间,*UF*曲线与*UB*曲线产生1个交点,即2010—2011年间出现突变点,但范围并没有突破±0.05置信水平区间,因此可以初步判定陈巴尔虎旗1990—2021年的RSEI变化整体比较平稳。

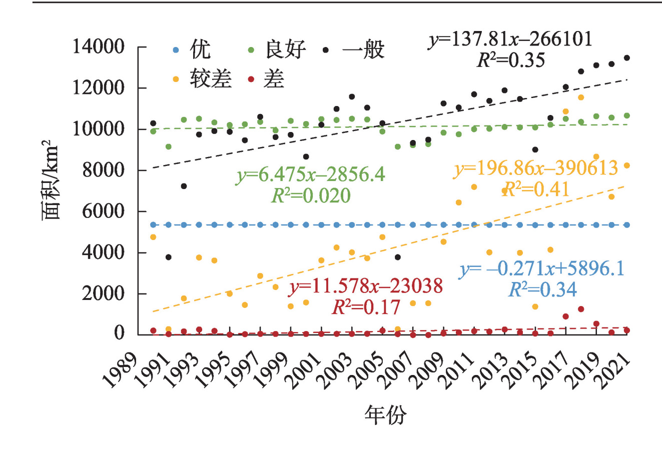


图7　RSEI等级面积变化

Fig. 7　Changes in the area of RSEI grades

3　讨 论

利用RSEI指数综合评估生态环境质量状况，所得结论与植被覆盖度一致[16]。植被覆盖度高的地方生态环境质量较好，植被覆盖度低的地方生态环境质量相对较差，说明生态环境质量综合评估了植被生长状况，适用于对植被进行整体分析，尤其是对不同植被覆盖度和土地利用类型。与前人研究一致，可在一定程度上反映草原畜牧承载能力、反映草原退化状况方面发挥重要作用[15]。

通过Mann-Kendall突变检验分析，陈巴尔虎旗RSEI在1990—2001年间呈下降趋势，从2001年开始逐渐升高，其中2012—2021年间显著增加，近10 a草原生态环境质量得到明显提升。该研究结果与土地生态状态类似，植被覆盖度与土地利用类型对研究区内生态环境质量都起到一定作用[23]。

由图10可知，1979—2021年间呼伦贝尔草原呈现出气温升高的发展趋势，使呼伦贝尔草原阶段性气象干旱频发[24]。对气温、降水与RSEI进行时间序列分析发现，1991年、2006年RSEI较低，但2006年降水量大于30 a平均值；2017年、2018年RSEI较高，但2个年份的降水量均低于30 a平均值。可以看出，气温和降水在一定程度上对于RSEI起到一定的综合影响。

草场利用方式随草场产权制度改变而改变。1983年，呼伦贝尔草原开始实施经济体制改革，推行草场承包到户政策，使用权30 a不变，即从“游牧”到“定牧”利用方式的演变[25]，草场利用方式在一定程度上影响到呼伦贝尔草原生态环境质量。为保护和改善草原牧区生态环境，保障我国生态屏障安全，我国颁布实施了众多生态工程，其中围栏禁牧是一种可以增加草地生物多样性和恢复生态服务功能的有效措施[26]。牧民对草地资源的珍惜，积极履行围栏禁牧政策，使得1990—2021年间呼伦贝尔草原植被生态环境质量呈现出了先短暂下降、再度上升的模式，总体呈现向好趋势。对于呼伦贝尔草原草地退化的影响因素深入分析发现，社会经济发展因子对呼伦贝尔草原退化的影响更大，其中陈巴

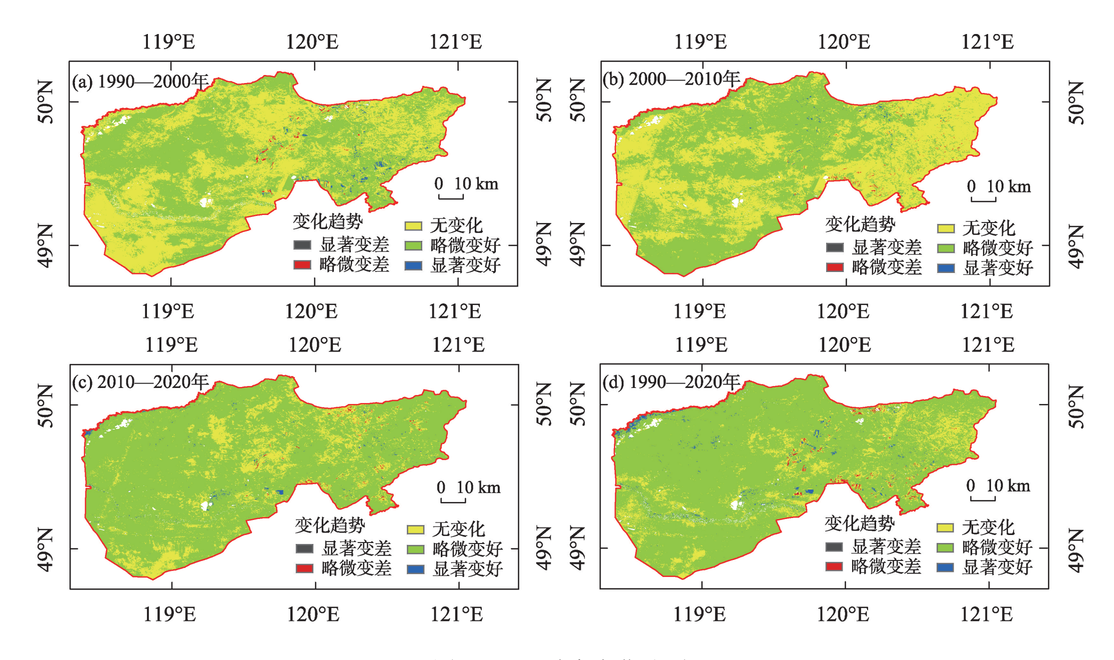


图8　RSEI动态变化监测

Fig. 8　Monitoring diagram of RSEI level change

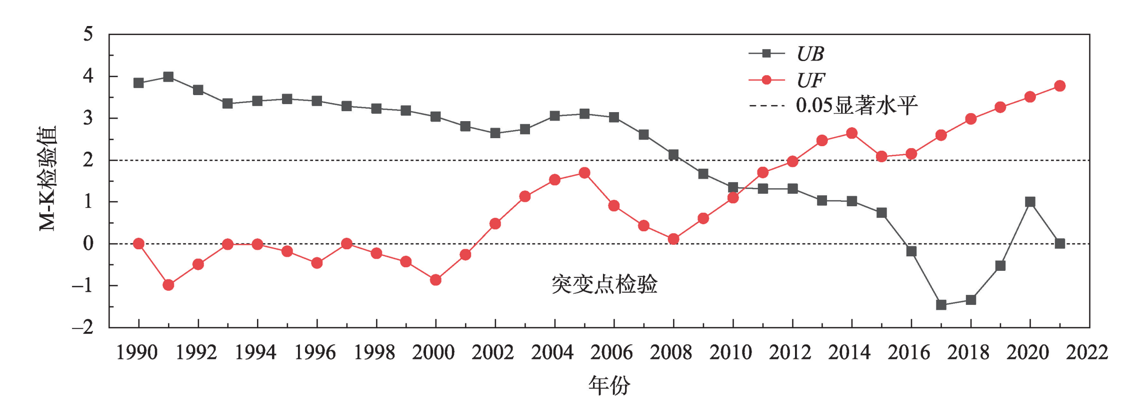


图9 1990—2021年M-K趋势分析

Fig. 9 M-K trend analysis from 1990 to 2021

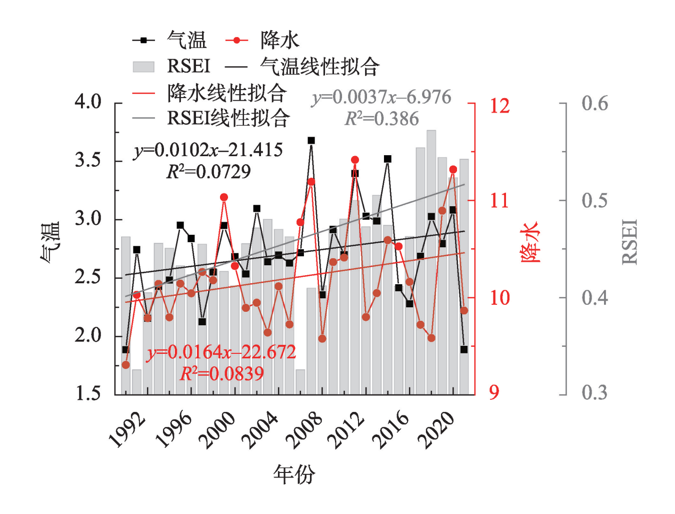


图10 气温、降水与RSEI时间序列分析

Fig. 10 Temperature, precipitation and RSEI time series analysis

尔虎旗草地退化主要影响因素是总人口数[27]。草场利用方式改变过程中，当地牧民对保护生态环境关注度逐渐增高，可见传统牧业生产对草原植被有一定影响，但如何做好草畜平衡状态还需进一步深入研究，立足于生态环境可持续发展的角度上，资源循环性畜牧业经营模式将是今后发展的重点[28]。另外，农业生产也改变了草原生态植被状况，因此宜农宜牧区应很好地界定并做好过渡带的修复和保护。

4 结 论

气候变化和人类活动复杂作用影响下，内蒙古呼伦贝尔草原生态环境质量正发生改变，因此利用多源遥感卫星数据分析其1990—2021年生长季(7—9月)生态环境质量，得到以下结论：

(1) RSEI可以对植被进行整体综合分析，尤其是对不同植被覆盖度和土地利用类型，1990—2021年间呼伦贝尔草原植被生态环境质量呈现出先短暂下降、再度上升的模式，总体呈现向好趋势。

(2) 研究区内RSEI的植被绿度对第一主成分的贡献最大，因此二者结果存在较高相似度；但生态环境质量的构成包括绿度、干度、湿度和热度等多要素，单一绿度难以完全表征区域生态环境质量。

(3) 内蒙古自治区呼伦贝尔市陈巴尔虎旗牧业草原森林、农耕发展区域生态环境质量在30 a间绝大部分优于放牧区域，RSEI呈现出由西向东逐渐变好的空间分布状况。

参考文献(References)：

[1] Hui Jiawei, Bai Zhongke, Ye Baoying. Eco-environment evaluation of grassland based on remote sensing ecological index: a case in hulunbuir area, China[C]// Scientific Research Publishing Thesis Collection in 2021 II. China: Scientific Research Publishing, 2021: 118-128.]

[2] 朱晓昱, 徐大伟, 辛晓平, 等. 1992—2015年呼伦贝尔草原区不同草地类型分布时空变化遥感分析[J]. 中国农业科学, 2020, 53(13): 2715-2727. [Zhu Xiaoyu, Xu Dawei, Xin Xiaoping, et al. The spatial- temporal distribution of different grassland types in Hulunber grassland based on remote sensing from 1992 to 2015 [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(13): 2715-2727.]

[3] 闫炜, 呼格吉勒图, 那仁满都拉. 呼伦贝尔草原气候变化特征简析——以陈巴尔虎旗为例[J]. 内蒙古科技与经济, 2016(16): 58-60. [Yan Wei, Hugjiletu, Narenmandula. A brief analysis of the characteristics of climate change in Hulunbuir grassland[J]. Inner Mongolia Science Teachnology & Economy, 2016(16): 58-60.]

[4] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用[J]. 生态学报,

2013, 33(24): 7853-7862. [Xu Hanqiu. A remote sensing urban ecological index and its application[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24): 7853-7862.]

[5] 刘英, 朱蓉, 岳辉.典型露天矿区生态环境遥感评价[J]. 西安科技大学学报, 2021, 41(4): 682-691. [Liu Ying, Zhu Rong, Yue Hui. Remote sensing evaluation of ecological environment in typical open-pit mining areas[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2021, 41(4): 682-691.]

[6] 排日海·合力力, 昝梅, 阿里木江·卡斯木. 乌鲁木齐市生态环境遥感评价及驱动因子分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1484-1496. [Pariha Helili, Zan Mei, Alimjan Kasim. Remote sensing evaluation of ecological environment in Urumqi City and analysis of driving factors[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(5): 1484-1496.]

[7] 高鹏文, 阿里木江·卡斯木, 图尔苏阿依·如孜, 等. 哈密市生态环境效益时空分析[J]. 干旱区研究, 2020, 37(4): 1057-1067. [Gao Pengwen, Kasim Alimujiang, Ruzi Tursunayi, et al. Temporal and spatial analysis of ecological environment improvement in Hami City[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(4): 1057-1067.]

[8] 张亚球, 姜放, 纪梦达, 等. 基于遥感指数的区县级生态环境评价[J]. 干旱区研究, 2020, 37(6): 1598-1605. [Zhang Yaqiu, Jiang Fang, Ji Mengda, et al. Assessment of the ecological environment at district and county level based on remote sensing index[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(6): 1598-1605.]

[9] 王丽霞, 赵蕊, 刘招, 等. 基于RSEI的延河流域生态环境质量监测与预估[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 943-954. [Wang Lixia, Zhao Rui, Liu Zhao, et al. Monitoring and prediction of ecological environmental quality in the Yanhe River Basin based on the remote sensing ecological index[J]. Arid Zone Research, 2022, 39 (3): 943-954.]

[10] 王勇, 王世东. 基于RSEI的生态质量动态变化分析——以丹江流域(河南段)为例[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(3): 57-65. [Wang Yong, Wang Shidong. Dynamic change analysis of ecological quality based on RSEI: A case study of the Danjiang River Basin (Henan section) [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17(3): 57-65.]

[11] 张永彬, 乔敏, 宇林军, 等. 生态景观特征的村镇聚落分类和生态环境质量评价——以北京市为例[J]. 测绘科学, 2021, 46(10) 159-166. [Zhang Yongbin, Qiao Min, Yu Linjun, et al. Village settlement classification and ecological environment quality evaluation based on ecological landscape characteristics: Take Beijing city as an example[J]. Science of Surveying and Mapping, 2021, 46 (10): 159-166.]

[12] 巩彩兰, 陈强, 尹球, 等. 海岸带生态环境基础质量遥感评价研究——以上海南汇东滩为例[J]. 海洋环境科学, 2011, 30(5): 711-714. [Gong Cailan, Chen Qiang, Yin Qiu, et al. Evaluation of eco-environment basic quality in coastal zone by remote sensing technique: Case study of Nanhui east tidal flat[J]. Marine Environmental Science, 2011, 30(5): 711-714.]

[13] Gorelick Noel, Hancher Matt, Dixon Mike, et al. Google earth engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 202: 18-27.

[14] Lu Jiaqi, Guan Hongliang, Yang Zhiqiang, et al. Dynamic monitoring of spatial-temporal changes in eco-environment quality in Beijing based on remote sensing ecological index with google earth engine[J]. Sensors and Materials, 2021, 33(12): 4595.

[15] 胡志超, 李政海, 黄朔, 等. 区域尺度上草原植被覆盖变化与碳增汇潜力的遥感分级评价方法研究[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2014, 45(5): 540-546. [Hu Zhichao, Li Zhenghai, Huang Shuo, et al. Classification evaluation for carbon sequestration potential of grassland vegetation by remote sensing at the regional scale: A case study of Hulunbeier grassland[J]. Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition), 2014, 45(5): 540-546.]

[16] 闫萧萧, 李晶, 杨震. 2000—2016年陈巴尔虎旗植被覆盖度时空变化遥感动态监测[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(6): 121-129. [Yan Xiaoxiao, Li Jing, Yang zhen. Dynamic remote sensing monitoring on the temporal-spatial chages of vegetation coverage in Chen Barag Banner from 2000 to 2016 [J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(6): 121-129.]

[17] 彭飞, 范闻捷, 徐希孺, 等. 2000—2014年呼伦贝尔草原植被覆盖度时空变化分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2017, 53 (3): 563-572. [Peng Fei, Fan Wenjie, Xu Xiru, et al. Analysis on temporal-spatial change of vegetation coverage in Hulunbuir steppe (2000-2014) [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2017, 53(3): 563-572.]

[18] 王乐, 刘德地, 李天元, 等.基于多变量M-K检验的北江流域降水趋势分析[J]. 水文, 2015, 35(4): 85-90. [Wang Le, Liu Dedi, Li Tianyuan, et al. Trend analysis of precipitation in Beijiang river basin based on Multivariate Mann-Kendall test[J]. Journal of China Hydrology, 2015, 35(4): 85-90.]

[19] 药劲松, 郭景福. 呼伦贝尔草原畜牧业发展路径探析[J]. 现代畜牧科技, 2022, 86(2): 13-18. [Yao Jinsong, Guo Jingfu. Exploration on the development path of animal husbandry in Hulunbeier grassland[J]. Technical Advisor for Animal Husbandry, 2022, 86(2): 13-18.]

[20] 付婧萍. 2020年呼伦贝尔市天然草原生产力动态监测分析[J]. 农业科技通讯, 2022(1): 220-222. [Fu Jingping. Dynamic monitoring and analysis of natural grassland productivity in Hulunbeier City in 2020[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2022(1): 220-222.]

[21] 郭阳, 贾志斌, 张琪, 等. 基于遥感数据的内蒙古呼伦贝尔草原草畜平衡时空动态研究[J]. 中国草地学报, 2021, 43(1): 30-37. [Guo Yang, Jia Zhibin, Zhang Qi, et al. Study on the spatiotemporal dynamics of forage-livestock balance in Hulunbuir grassland of Inner Mongolia based on remote sensing data[J]. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(1): 30-37.]

[22] Yang Jie, Huang Xin. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907-3925.

[23] 邓晓娟, 李晶, 殷守强, 等. 陈巴尔虎旗土地生态状况评价及影响因素分析[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(11): 162−172. [Deng Xiaojuan, Li Jing, Yin Shouqiang, et al. Evaluation of land ecological status and analysis of influencing factors in Chenbarhu Banner[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(11): 162−172.]

[24] 洪海岳. 1970—2020年呼伦贝尔草原气候变化特征分析[J]. 农业灾害研究, 2021, 11(12): 84−85, 87. [Hong Haiyue. Analysis of characteristics of climate change in Hulunbuir grassland during 1970− 2020[J]. Journal of Agricultural Catastropholgy, 2021, 11 (12): 84−85, 87.]

[25] 赵红羽. "文革"结束后内蒙古自治区草原产权制度的演变(1977—2005)[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2015. [Zhao Hongyu. After the "Cultural Revolution" the Study on the Evolution of Property Right System of Grassland, Inner Mongolia (1977−2005) [D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2015.]

[26] 王骞, 雷榕榕, 薛贤茹, 等. 东北草原围栏禁牧政策牧民满意度及影响因素实证研究[J]. 中国草地学报, 2022, 44(10): 84−94. [Wang Qian, Lei Rongrong, Xue Xianru, et al. An empirical study on the satisfaction and influencing factors of herdsmen to grazing exclosion using fences policy in northeast grasslands of China[J]. Chinese Journal of Grassland, 2022, 44(10): 84−94.]

[27] 张志莉. 呼伦贝尔草原草地退化的影响因素的统计分析[J] 内蒙古大学学报(自然科学版), 2020, 51(6): 608−614. [Zhang Zhili. Statistical analysis of factors affecting grassland degradation in Hulunbuir grassland[J]. Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition), 2020, 51(6): 608−614.]

[28] 王菁. 内蒙古农牧交错带畜牧业经营模式研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013. [Wang Jing. Reasearch on the Livestock Bussiness Model of the Ecotone of Inner Mongolia[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013.]

Detecting the change and trend of remote sensing ecological quality in Inner Mongolia from 1990−2021: A case study of Chenbarhu Banner of Hulunbuir City

ZHANG Yusi[1,2], BAO Yuhai[1,2], HE Zhonghua[3]

(1. School of Geographical Sciences, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, Inner Mongolia, China; 2. Key Laboratory of Remote Sensing and Geographic Information System of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010022, Inner Mongolia, China; 3. Zhejiang Climate Center, Hangzhou 310056, Zhejiang, China)

Abstract: The ecological civilization construction in Inner Mongolia, an important ecological barrier in northern China, is important for national ecological security, the stability of the border areas, and the sustainable economic and societal development of the minority areas. In this study, we extracted four key indices based on long-term satellite observations to describe the quality of the ecosystem. We constructed the remote sensing ecological index (RSEI) through principal component analysis. Furthermore, we adopted the Mann-Kendall (M-K) trend test for analyzing the changes in ecological quality in the Hulunbuir grassland of Inner Mongolia from 1990 to 2021. The RSEI can comprehensively reflect the quality of the ecological environment, and results revealed that the quality of grassland in Inner Mongolia has improved in the past 30 years, with an increasing trend of 0.0037 every year ($P < 0.01$; $R^2 = 0.39$). The significant increasing trend of RSEI and the improved ecological quality from 2012 to 2021 was further verified through the M-K trend significance test. A single factor cannot fully characterize regional ecological quality so, four factors i.e., greenness, dryness, humidity, and heat were included in RSEI. The space quality showed a gradual improvement from west to east, with lower RSEI for grassland in the west compared with that for forest and farming areas in the east. A similar trend for quality was observed with the variation of the vegetation coverage. This study enriched the assessment methods of grassland ecological quality in Inner Mongolia, which can provide an important reference for the ecological protection, restoration, utilization, and sustainable development of meadow steppe in Inner Mongolia.

Keywords: Hulunbuir grassland; Chenbarhu Banner; RSEI; Landsat; spatiotemporal analysis